برآورد هدایت هیدرولیکی آبخوان عسلویه با استفاده از روابط تجربی مبتنی بر دانه‌بندی آبرفت*

مقاله پژوهشی

مریم جمالی دیزجی(۱) مرتضی مظفری(۲) الهام فیجانی(۳) رویا اسکندری(۴)

چکیده هدایت هیدرولیکی مهم‌ترین متغیر در معادله‌های جریان آب زیرزمینی است که در برآورد سرعت جریان آب، پیش‌بینی چگونگی انتقال آلاینده، حل مشکلات ژئوتکنیکی و تعیین برنامه‌های مدیریت منابع آب زیرزمینی نقش دارد. در این پژوهش کوشش شده تا با استفاده از روش رابطه‌های تجربی، میزان هدایت هیدرولیکی در بخشی از آبخوان عسلویه برآورد گردد. به این منظور، از دستاوردهای ۲۰ آزمایش دانه‌بندی آبرفت و ترسیم منحنی توزیع اندازه ذرات خاک، برای تهیه داده‌های مورد نیاز استفاده شده‌است. مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌دست‌آمده از روش تجربی بین ۰/۱ تا ۴/۳ سانتی متر بر روز متغیر است که در محدوده مقادیر هدایت هیدرولیکی رایج مواد ریزدانه می‌باشد. با توجه به میزان گراول و ماسه قابل توجه در نمونه‌ها، به نظر می‌رسد که مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده تا حدی کمتر از مقدار واقعی آن باشد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با توجه به شرایط و محدودیت‌های موجود برای استفاده از روابط تجربی، مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده دامنه گسترده‌ای از تغییرات را در بر می‌گیرد. بنابراین انجام آزمایش پمپاژ برای صحت‌سنجی مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسباتی پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی آبخوان دشت عسلویه، هدایت هیدرولیکی، روابط تجربی، منحنی دانه‌بندی.

مقدمه

هدایت هیدرولیکی به معنای توانایی یک محیط متخلخل برای عبور سیال است. این ویژگی بیانگر مقدار جریان عبوری تحت شیب هیدرولیکی معین از سطح مقطع خاک می‌باشد و مهم‌ترین متغیر در کاربرد قانون‌های جریان آب زیرزمینی است[1]. هدایت هیدرولیکی یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های آبخوان است که در تخمین سرعت جریان آب زیرزمینی، تعیین نحوه انتشار ابر آلودگی، شبیه سازی جریان آب زیرزمینی، حل مشکلات ژئوتکنیکی و تعیین برنامه‌های مدیریت منابع آب زیرزمینی نقش دارد (ساها و همکاران، ۲۰۱۶). روش‌های اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی به دو گروه مبتنی بر قانون دارسی و مبتنی بر روابط تجربی (بر اساس توزیع اندازه منافذ، توزیع اندازه ذرات و بافت خاک) تقسیم می‌شوند. روش‌های مبتنی بر رابطه دارسی به دو دسته آزمایشگاهی و صحرایی قابل گروه‌بندی هستند. در روش‌های آزمایشگاهی، جریان آب در طول یک نمونه کوچک از مواد مورد نظر برقرارشده و افت بار و سرعت جریان از این طریق مشخص می‌گردد. در روش بار ثابت، بار آبی ثابت است، دبی عبوری از نمونه خاک در گذر زمان اندازه‌گیری می‌شود و مقدار هدایت هیدرولیکی با استفاده از قانون دارسی از محاسبه می‌گردد. در روش بار افتان، با اندازه‌گیری سرعت افت بار آبی و دانستن مقدار سرعت جریان گذرکننده از نمونه خاک، میزان هدایت هیدرولیکی بر اساس رابطه دارسی تعیین می‌گردد[2,3]. روش‌های صحرایی به دو دسته کلی روش‌های کوچک مقیاس و روش‌های بزرگ مقیاس تقسیم می‌شوند. در روش‌های کوچک مقیاس، مقدار هدایت هیدرولیکی در بخش اشباع و غیر اشباع خاک با کمک ابزارهای گوناگون محاسبه می‌گردد. مهم‌ترین روش‌های بزرگ مقیاس شامل آزمایش پمپاژ و ردیابی است[2]. آزمون پمپاژ رایج‌ترین روش برای محاسبه هدایت هیدرولیکی آبخوان از گروه روش‌های بزرگ مقیاس است که در آن براساس مشاهده رفتار سطح آب در اطراف چاه پمپاژ می‌توان مقادیر هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره آبخوان را به‌دست آورد[3]. در برخی از دشت‌ها امکان انجام آزمایش پمپاژ و ردیابی (به‌دلیل فراهم نبودن شرایط انجام) وجود ندارد و تنها داده‌های حاصل از حفاری در دسترس است. در این جایگاه‌ها،

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۳/۲۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۱۲/۱۸ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران.
(۲) نویسنده مسئول، استادیار دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران. **Email**: mmozafari@ut.ac.ir
(۳) استادیار دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران.
(۴) کارشناس ارشد زمین شناسی زیست‌محیطی.

برای محاسبه هدایت هیدرولیکی می‌توان از روش روابط تجربی استفاده کرد.

پژوهشگرهای زیادی برای تعیین رابطه بین توزیع اندازه ذرات خاک و هدایت هیدرولیکی آن کار کرده‌اند (هازن، ۱۸۹۲؛ اسلیتچر، ۱۸۹۹؛ کزنی، ۱۹۲۷؛ کارمن، ۱۹۳۷، ۱۹۵٦؛ کرومبین و مونک، ۱۹٤۲؛ بریر، ۱۹٦٤؛ ترزاقی و پک، ۱۹٦٤؛ ماسچ و دنی، ۱۹٦٦). وانکه و همکاران در سال ۲۰۰۰ و هیفده بر روی ٤۳۱ نمونه که از محیط‌های رسوبی مختلف جمع‌آوری شده بود مطالعه کردند و معادلات جدیدی برای محاسبه‌ی هدایت هیدرولیکی ارائه نمودند [4]. رزاز و همکاران (۲۰۱٤) با مطالعه بر روی نمونه‌هایی با قطر مؤثر ۰/۰۵ تا ۰/۸۳ میلی‌متر و ضریب یک‌نواختی ۱/۳ تا ۱۸/۳ به این نتیجه رسیدند که مقادیر هدایت هیدرولیکی بسیار تحت تأثیر قطر مؤثر ذرات در منحنی‌های دانه‌بندی می‌باشد [5]. آرفین و علی خان (۲۰۲۰) با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و روابط تجربی (مبتنی بر منحنی توزیع اندازه‌ی ذرات) هدایت هیدرولیکی ۲۵ نمونه خاک را تعیین نمودند. روابط تجربی به‌کار رفته شامل روش های هازن، اسلیتچر، بریر و کزنی- کارمن بود. هم‌چنین از رابطه وکوویچ و سورو (۱۹۹۲) برای محاسبه‌ی تخلخل و چگانی توده(Bulk density) استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که فرمول‌های تجربی برای محاسبه هدایت هیدرولیکی نمونه‌های با طیف گسترده‌ای از اندازه‌ی ذرات مناسب است[6]. ایشاکو و همکاران (۲۰۱۰) در منطقه‌ی جیمتا-یولا واقع در کشور نیجریه مقادیر هدایت هیدرولیکی نمونه‌های حاصل از حفاری را از طریق فرمول‌های تجربی محاسبه نمودند و به این نتیجه رسیدند که روابط ترزاقی، کزنی و اسلیتچر بهترین مقادیر را برای هدایت هیدرولیکی آبخوان ماسه‌سنگی این منطقه ارائه می‌دهد[7]. تایی هوآنگ و همکاران (۲۰۱۷) مقادیر هدایت هیدرولیکی برای خاک‌های ماسه‌ای درشت‌دانه، متوسط و ریزدانه را از فرمول‌های تجربی، تهیه مدل تخلخل مؤثر نسبی و آزمایش ردیابی به‌دست آوردند و نتایج حاصل را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌داد که مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌دست‌آمده از رابطه کزنی-کارمن ۱/۵تا ۱/۷ برابر مقادیر حاصل از روش هازن می‌باشد. هم‌چنین اختلاف بین مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌دست‌آمده در روش ردیابی و فرمول‌های تجربی بیشتر از نتایج حاصل از مدل است. نتیجه نهایی تأییدکننده نزدیکی بیشتر هدایت هیدرولیکی حاصل از مدل به شرایط واقعی بود[8]. ساهو و ساها (۲۰۱٦) مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌دست‌آمده از فرمول‌های تجربی (روابط هازن و بریر) و آزمون پمپاژ را با یکدیگر مقایسه کردند. در این پژوهش هدایت هیدرولیکی برای نمونه‌های حاصل از حفاری چهار گمانه به عمق ۳۰ متر به‌روش تجربی مبتنی بر توزیع اندازه ذرات صورت گرفت. نتایج نشانگر تفاوت آشکار مقادیر هدایت هیدرولیکی حاصل از روابط تجربی و آزمایش پمپاژ بود[4].

دشت عسلویه در حاشیه خلیج فارس و در فاصله ۳۰۰ کیلومتری شرق شهر بوشهر قرار دارد و به‌عنوان منطقه ساحلی مناسب برای ایجاد واحدهای خشکی و توسعه مرحله‌ای میدان گازی پارس جنوبی (شامل پالایشگاه‌ها و خطوط انتقال) انتخاب شده‌است (شکل ۱). با توجه به بالا بودن تراز آب زیرزمینی، آلودگی نشت کرده از خطوط انتقال و مخازن پالایشگاه‌ها می‌تواند سبب آلودگی آب زیرزمینی دشت بشود. بنابراین شناخت ویژگی آبخوان آزاد دشت (از جمله هدایت هیدرولیکی) دارای اهمیت است و می‌تواند به مطالعه آبخوان، شبیه‌سازی شرایط حاکم بر جریان آب زیرزمینی و هم‌چنین ارائه برنامه‌های مدیریتی منابع آب آن کمک نماید. در پژوهش پیش رو کوشش شده تا با استفاده از رابطه‌های تجربی مبتنی بر نتایج منحنی دانه‌بندی آبرفت، هدایت هیدرولیکی در بخشی از آبخوان عسلویه محاسبه گردد.

منطقه مورد مطالعه و روش پژوهش

از نظر زمین‌شناسی، دشت عسلویه در پهنه ساختاری زاگرس قرار دارد و تاقدیس عسلویه مهم‌ترین ساختار زمین‌ساختی آن است. مهم‌ترین واحدهای سنگ‌چینه‌ای سازنده تاقدیس عسلویه از قدیم به جدید عبارتند از: گروه خامی (شامل سازندهای سورمه، هیث، فهلیان، گدوان و داریان)، گروه بنگستان (شامل سازندهای کژدمی، سروک و ایلام)، سازندهای گورپی، پابده، و جهرم-آسماری، گروه فارس (متشکل از سازندهای گچساران، میشان و آغاجاری) و کنگلومرای بختیاری[9]. دشت عسلویه به‌صورت نوار باریکی در بین تاقدیس عسلویه در شمال و خلیج فارس در جنوب قرار دارد و از رسوبات کواترنری تشکیل شده‌است. سطح ایستابی در دشت عسلویه در عمق ۱۰ تا ۱۵ متری قرار دارد و جهت عمومی جریان آب زیرزمینی از شمال دشت به‌سوی دریا است.



شکل ۱ نمایی از تاقدیس عسلویه و دشت عسلویه. جهت نگاه به شمال باختر.

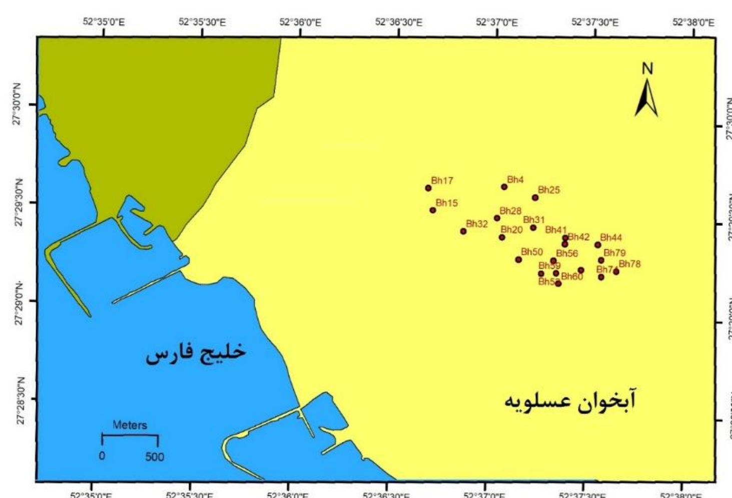
در این پژوهش کوشش شده تا با استفاده از آزمایش برروی نمونه‌های خاک حاصل از حفاری ۲۰ گمانه در دشت عسلویه (شکل ۲)، تخمین مناسبی از هدایت هیدرولیکی آن به‌دست آید. برای این منظور، ابتدا نمونه خاک از عمیق‌ترین بخش گمانه‌های حفر شده برداشته شد و برای آنالیز دانه‌بندی به آزمایشگاه زمین‌شناسی دانشگاه تهران ارسال گردید. در آزمایشگاه، آزمایش توزیع اندازه ذرات (با کمک الک کردن برای خاک‌های با اندازه ذرات بزرگ‌تر از ۰/۰۷ میلی‌متر و هیدرومتری برای ذرات ریزتر) بر روی نمونه‌ها انجام شد. برای این کار، ابتدا نمونه خاک شسته شد تا رس و سیلت از آن جدا شود و سپس برای مدت ٢٤ ساعت در کوره با درجه حرارت حدود ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا به‌صورت کامل خشک گردد. در مرحله بعد کلوخه‌های خاک خورد شده و جرم نمونه مشخص گردید و سپس نمونه خاک از الک‌ها عبور داده شد. بعد از اتمام مرحله الک کردن، جرم خاک باقی‌مانده بر روی هر الک اندازه‌گیری شد (شکل ۳). هم‌چنین مقادیر سیلت و رس نمونه‌ها با استفاده از آزمایش هیدرومتری مشخص گردید. پس از تعیین اندازه ذرات نمونه‌ها، از نمودار فولک[10,11] برای تعیین نوع آن‌ها استفاده شد. در نهایت نتیجه به‌دست‌آمده از آزمایش دانه‌بندی در یک نمودار تجمعی نیمه لگاریتمی نمایش داده شد که در آن ارقام مربوط به درصد تجمعی جرم ذرات بر روی محور عمودی و اندازه ذرات بر روی محور افقی نمایش داده می‌شود. پس از رسم نموار توزیع اندازه ذرات، پارامترهای مورد نیاز محاسبه هدایت هیدرولیکی با استفاده از روابط تجربی به‌دست آمد. مهم‌ترین این پارامترها عبارتند از: قطر مؤثر ذرات که در اغلب فرمول‌ها قطری که ۱۰ درصد ذرات از آن کوچک‌تر باشند به‌عنوان قطر مؤثر انتخاب شده‌است (d_{10})، ضریب یک‌نواختی (C_u)، قطری که ۳۰ درصد ذرات از آن کوچک‌تر باشند (d_{30}) و قطری که ٦۰ درصد ذرات از آن کوچک‌تر باشند (d_{60}).

در مرحله بعد، با استفاده از روابط تجربی ارائه‌شده در جدول (۱) مقادیر هدایت هیدرولیکی مشخص گردید. شایان ذکر است که این فرمول‌ها براساس کارهای تحلیلی و تجربی برای محاسبه مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌دست آمده‌اند و هر کدام دارای شرایط و محدودیت‌های ویژه خود می‌باشند[12,13,14]. همانطور که در رابطه‌های جدول (۱) دیده می‌شود، محاسبه تراوایی با استفاده از برخی روابط (مانند رابطه کزنی-کارمن) نیازمند دانستن تخلخل نمونه‌های خاک است. تخلخل نمونه‌های خاک از رابطه شماره (۱) محاسبه گردید که در آن n، ρ_m و ρ_d به‌ترتیب تخلخل، چگالی ذرات و چگالی توده می‌باشد.

$$n = (\rho_m - \rho_d)/ \rho_m \qquad (1)$$

چگالی ذرات خاک برای نمونه‌های این مطالعه برابر با ۲/٦٥ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شده‌است. هم‌چنین برای محاسبه چگالی توده (جرم واحد حجم توده، شامل حجم دانه‌ها و فضای خالی بین آن‌ها) به‌ترتیب یاد شده عمل شد و سپس با جای‌گذاری آن در رابطه شماره (۱) مقدار تخلخل نمونه‌های انتخابی به‌دست آمد: ۱) از بین نمونه‌های حاصل از حفاری تعداد ۱۷ نمونه از توده خاک (که تقریباً دست‌نخورده بود) برداشت شد و جرم هر یک اندازه‌گیری شد، ۲) نمونه‌ها توسط پارافین پوشیده شد، ۳) جرم نمونه‌های پوشیده‌شده از پارافین اندازه‌گیری گردید

و حجم آن‌ها نیز با فرو بردن در ظروف مدرج پر از آب مشخص شد، ٤) با کم کردن حجم پارافین از حجم نمونه‌ها، حجم توده خاک مشخص گردید، و ٥) جرم توده خاک بر حجم آن تقسیم شد.



شکل ۲ موقعیت گمانه‌های مورد مطالعه در گستره دشت عسلویه




الف) ب)




ج) د)

شکل ۳ آماده سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش دانه‌بندی: الف) شستشوی نمونه‌ها، ب) خورد کردن کلوخه‌ها پس از خروج از کوره، ج) الک کردن و د) اندازه گیری جرم باقیمانده بر روی هر الک

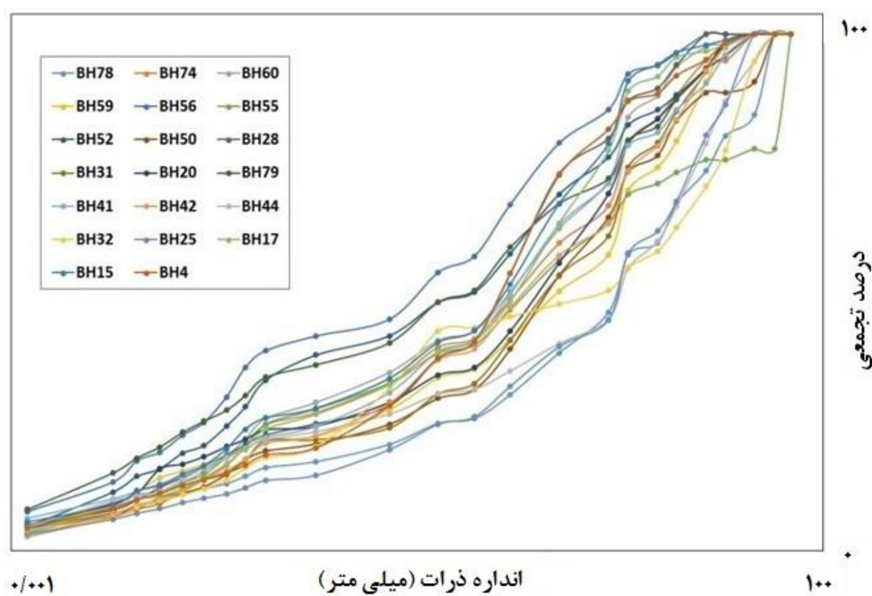
جدول ۱. روابط تجربی مورد استفاده برای تعیین مقدار هدایت هیدرولیکی

نام رابطه	فرمول تجربی
کزنی-کارمن (Kozeny_Carman)	$K=(\frac{g}{v}) \times (8.3 \times 10^{-3})\times[\frac{n^3}{(1-n)^2}]\times d_{10}^2$, $n= 0.225(1+0.83^{Cu})$ K = hydraulic conductivity; g = acceleration due to gravity; v = kinematic viscosity; n=porosity from empirical formula; d10= Diameter that 10% of the grains are smaller than.
بریر (Breyer)	$K=(\frac{g}{v}) \times (6 \times 10^{-4})\times[\log(\frac{500}{Cu})]\times d_{10}^2$, $C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ K = hydraulic conductivity; g = acceleration due to gravity; v = kinematic viscosity Cu=Uniformity coefficient d_{10}=Diameter that 10% of the grains are smaller than. d_{60}=Diameter that 60% of the grains are smaller than.
گوستافسون (Gustafson)	$K= E(C_u)(\frac{d_{10}}{1000})^2$, $E(C_u)= (10.2 \times 10^6)(\frac{E^3}{1+E})(\frac{1}{g(C_u)^2})$, $E= 0.8(\frac{1}{2Ln(C_u)} - \frac{1}{(C_u)^2-1})$ $g(C_u)= (\frac{1.3}{\log C_u})(\frac{(C_u)^2-1}{(C_u)^{1.8}})$, $C_u= \frac{d_{60}}{d_{10}}$ Cu=Uniformity coefficient d_{10}=Diameter that 10% of the grains are smaller than.
اسلیتچر (Slitcher)	$K= \frac{g}{v} . 1\times 10^{-2} .n^{3.287}. d_{10}^2$, $n= 0.255(1+0.83^{Cu})$, $C_u= \frac{d_{60}}{d_{10}}$ K = hydraulic conductivity; g = acceleration due to gravity; v = kinematic viscosity; n=porosity from empirical formula; d10= Diameter that 10% of the grains are smaller than. Cu=Uniformity coefficient; d_{60}=Diameter that 60% of the grains are smaller than.
ترزاقی (Terzaghi)	$K= \frac{g}{v} .C_t. (\frac{n-0.13}{\sqrt[3]{1-n}})^2. d_{10}^2$ K = hydraulic conductivity; g = acceleration due to gravity; v = kinematic viscosity; n=porosity from empirical formula; d10= Diameter that 10% of the grains are smaller than. Ct= the sorting coefficient between 6.1×10^{-3} and 10.7×10^{-3}, and the average value of Ct, 8.4×10^{-3}

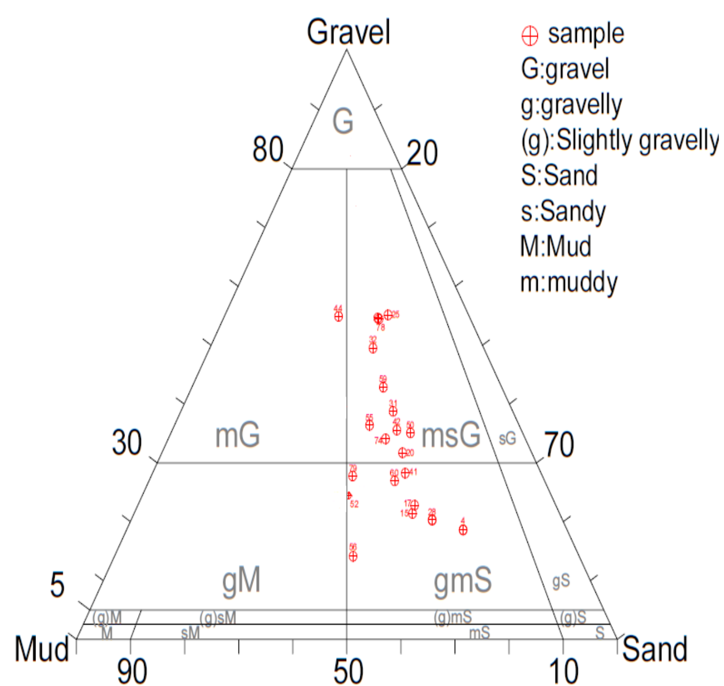
واکاوی دستاوردها

دانه‌بندی ذرات. منحنی دانه‌بندی اندازه ذرات برای نمونه‌های مورد مطالعه در شکل (٤) ترسیم گردیده‌است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، نمونه‌های مورد مطالعه دامنه گستره‌ایی از توزیع اندازه ذرات (از سیلت و رس تا گراول) را شامل می‌گردد؛ به عبارت دیگر، شیب منحنی دانه‌بندی ذرات از حالت عمودی بسیار فاصله دارد. شکل (۵) و جدول (۲) نتایج برازش تعیین اندازه ذرات نمونه‌ها در نمودار فولک را نشان می‌دهد. از ۲۰ نمونه مورد مطالعه، ۱۰ عدد از نوع گراول ماسه‌ای- گلی، ۹ عدد از نوع ماسه گلی- گراولی و یک نمونه از نوع گراول- گلی است. با توجه به این‌که رسوبات مورد آزمایش از نوع آبرفتی می‌باشند، بنابراین تنوع اندازه ذرات در آن‌ها زیاد است. مقادیر ضریب یک‌نواختی در اغلب نمونه‌ها عدد بزرگی بود که نشانگر دامنه گسترده تغییر اندازه ذرات خاک است.

رسوب‌های سازنده دشت عسلویه (نهشته‌های کواترنری) بیشتر حاصل فرسایش سازندهای رخنمون یافته در تاقدیس عسلویه می‌باشد. شرایط زمین‌شناسی همراه با اقلیم و هیدرولوژی منطقه سبب هوازدگی شدید سنگ‌ها در تاقدیس عسلویه شده‌است. از سوی دیگر، دامنه پرشیب تاقدیس و اختلاف ارتفاع شدید در مسافتی کوتاه سبب می‌شود که رواناب حاصل از بارندگی دارای دبی زیاد و زمان تمرکز کوتاه باشد. بنابراین پتانسیل فرسایش و رسوب‌زایی منطقه به‌طور طبیعی زیاد است. باتوجه به عرض کم دشت، به‌نظر می‌رسد که رسوب‌های شکل‌گرفته از فرسایش فرصت چندانی برای جدایش و دانه‌بندی بر اساس کاهش انرژی رواناب‌ها نداشته‌اند. با این وجود و به‌صورت طبیعی با حرکت به‌سمت نواحی پایین‌دست دشت از مقدار و اندازه قلوه‌ها و بولدرهای سنگی کاسته می‌شود.



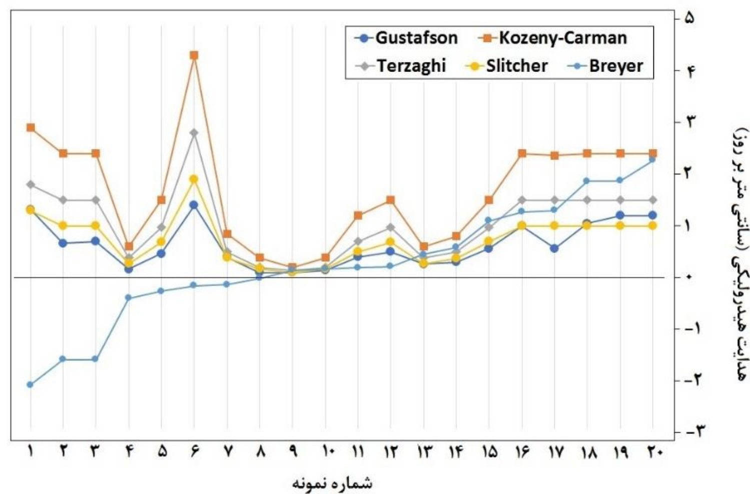
شکل ٤ منحنی توزیع اندازه ذرات نمونه‌ها



شکل ٥ طبقه بندی نمونه‌ها بر اساس مثلث فولک

جدول ۲ نام گمانه، عمق نمونه‌برداری و نوع نمونه‌ها

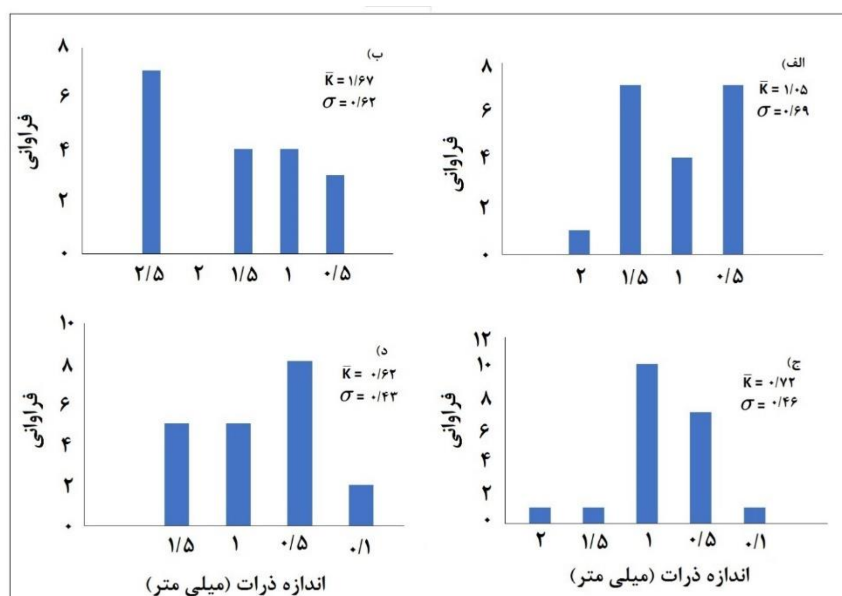
نام گمانه	عمق(m)	ضریب یکنواختی	نوع نمونه
BH٤	۱۲	۳/۰	ماسه گلی گراولی
BH۱۵	۱۰	۲/۰	ماسه گلی گراولی
BH۱۷	۱۳/۸	۲/۳	ماسه گلی گراولی
BH۲۰	۱۵	٤/۲	گراول ماسه‌ای گلی
BH۲۵	۲۱	۵/۲	گراول ماسه‌ای گلی
BH۲۸	۹	۲/۵	ماسه گلی گراولی
BH۳۱	١٤/۵	۵/۹	گراول ماسه‌ای گلی
BH۳۲	۱۵	۱۰/۰	گراول ماسه‌ای گلی
BH٤۱	۱۱	۲/۵	ماسه گلی گراولی
BH٤۲	۱۱	۳/۰	گراول ماسه‌ای گلی
BH٤٤	١٦/۵	۹/۵	گراول گلی
BH۵۰	۱۲/۵	٤/٤	گراول ماسه‌ای گلی
BH۵۲	۱۲/۵	۳/۲	ماسه گلی گراولی
BH۵۵	١٤	۵/۸	گراول ماسه‌ای گلی
BH۵٦	۱۳	۲/۷	ماسه گلی گراولی
BH۵۹	۸/۵	۹/٦	گراول ماسه‌ای گلی
BH٦۰	۱۲	۵/۲	ماسه گلی گراولی
BH۷٤	۱۵	۲/۷	گراول ماسه‌ای گلی
BH۷۸	۱۵	۹/۵	گراول ماسه‌ای گلی
BH۷۹	١٤	۲/٤	ماسه گلی گراولی



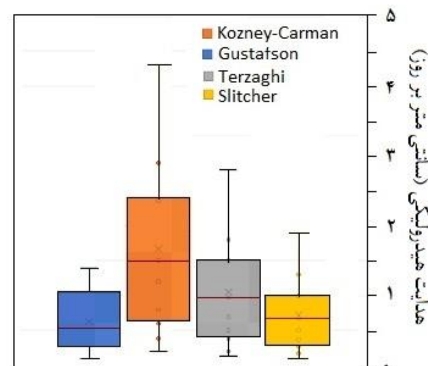
شکل ٦ مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده از روش‌های تجربی مختلف

محاسبه هدایت هیدرولیکی. نتایج حاصل از محاسبه هدایت هیدرولیکی براساس روش‌های تجربی مختلف در شکل‌های (٦) و (۷) نشان داده شده‌است. براساس روش بریر، مقدار هدایت هیدرولیکی نمونه‌ها بین ۰/۰۱۹- تا ۲/۲ سانتی‌متر بر روز به‌دست آمد. رابطه بریر برای نمونه‌هایی با توزیع ناهمگن و دانه‌بندی ضعیف با ضریب یک‌نواختی بین ۱ تا ۲۰ و اندازه مؤثر ۰/٦ تا

۰/۰۶ میلی‌متر بسیار مفید است[12]. در نمونه‌های مورد مطالعه این پژوهش، از یک‌سو مقادیر ضریب یک‌نواختی همه نمونه‌ها بزرگ است و از سوی دیگر قطر مؤثر نمونه‌ها نیز کوچک‌تر از ۰/۰۶میلی‌متر است، بنابراین رابطه بریر برای محاسبه هدایت هیدرولیکی آن‌ها مناسب نیست. مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌روش گوستافسون، کزنی- کارمن، ترزاقی و اسلیتچر به‌ترتیب بین ۰/۱ تا ۱/٤، ۰/۳۸ تا ٤/۳، ۰/۲ تا ۲/۸، ۰/۱۷ تا ۱/۹ سانتی‌متر بر روز به‌دست‌آمد. دامنه گسترده تغییرات هدایت هیدرولیکی می‌تواند ناشی از گستره تنوع اندازه ذرات نمونه‌ها از گراول تا سیلت باشد. مقادیر بزرگ‌تر هدایت هیدرولیکی مربوط به نمونه‌های با درصد گراول و ماسه بیشتر است و مقادیر کم نیز به نمونه‌هایی با درصد رس بیشتر تعلق دارد. در محیط متخلخل ناهم‌گن، چنین شرایطی می‌تواند موجب گردد که ذرات ریزدانه فضای خالی بین ذرات درشت‌دانه را پرکند و هدایت هیدرولیکی را کاهش دهد. مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌روش گوستافسون، کزنی- کارمن، ترزاقی و اسلیتچر در نمودار جعبه‌ایی ترسیم شده‌است (شکل ۸). به‌دلیل معنی‌دار نبودن مقادیر منفی هدایت هیدرولیکی، در این شکل مقادیر محاسبه شده بر اساس رابطه بریر آورده نشده‌است. هدایت هیدرولیکی محاسبه شده براساس رابطه‌های گوستافسون و اسلیتچر مقادیر کم و بیش مشابهی را حاصل نموده‌است. بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی محاسبه‌شده مربوط به رابطه کزنی- کارمن می‌باشد و رابطه ترزاقی نیز مقادیر هدایت هیدرولیکی حد واسطی را نشان می‌دهد. دلیل تفاوت هدایت هیدرولیکی محاسبه‌شده بر اساس این رابطه‌ها، می‌تواند به تفاوت سهم پارامترهای مؤثر در هر رابطه و محدودیت‌های مربوط به ضریب یک‌نواختی و قطر مؤثر ذرات برگردد. برای نمونه، استفاده از رابطه کزنی- کارمن برای ذرات با قطر مؤثر کمتر از ۳ میلی‌متر کاربرد دارد و برای خاک‌های رسی توصیه نمی‌شود[12]. در تمام ۲۰ نمونه مورد بررسی، مقدار قطر مؤثر دانه‌ها، کمتر از ۳ میلی‌متر است و ذرات تشکیل‌دهنده آن‌ها علاوه‌بر رس، مقادیری گراول و ماسه دارند. بنابراین از این رابطه می‌توان برای نمونه‌های با مقدار گراول کم استفاده کرد. رابطه اسلیتچر برای رسوبات با قطر مؤثر بین ۰/۰۱تا ۵ میلی‌متر مناسب است [12,13] و در نتیجه این رابطه برای محاسبه هدایت هیدرولیکی ۹ عدد از نمونه‌ها (که این شرط در آن‌ها رعایت شده) کابرد دارد. رابطه گوستافسون برای رسوبات با ضریب یک‌نواختی بزرگ‌تر از ۱۵ کاربرد دارد[14] که به‌دلیل دارا بودن این شرط، از این فرمول می‌توان برای محاسبه هدایت هیدرولیکی همه نمونه‌ها استفاده کرد. رابطه ترزاقی برای ماسه‌های درشت‌دانه کاربرد دارد[12]. نمونه‌های موجود اغلب حاوی ماسه در اندازه‌های مختلف هستند و در نتیجه رابطه ترزاقی برای آن‌ها قابل استفاده‌است.



شکل ۷ فراوانی، میانگین و انحراف از معیار مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده از روش‌های: الف) ترزاقی؛ ب) کوزنی-کارمن ؛ ج) اسلیتچر؛ و د) گوستافون



شکل ۸ نمودار جعبه اییمقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده از روش های تجربی مختلف

نتیجه‌گیری

مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌دست‌آمده از روش تجربی برای ۲۰ نمونه مورد مطالعه بین ۰/۱ تا ٤/۳ سانتی‌متر بر روز متغیر است که در محدوده مقادیر هدایت هیدرولیکی رایج مواد ریزدانه می‌باشد. به نقل از تاد و میز (۲۰۰۵) مقادیر هدایت هیدرولیکی برای گراول بین ۱۵۰ تا ٤٥۰ متر بر روز، برای ماسه بین ۲/۵ تا ٤٥ متر بر روز و برای سیلت و رس بین ۰/۰۰۰۲ تا ۰/۰۸ متر بر روز است. به نظر می‌رسد که قادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه‌شده برای نمونه‌های مورد مطالعه تا حد زیادی کمتر از مقدار واقعی آن باشد، چرا که از ۲۰ نمونه حاصل از حفاری، ٥۰ درصد در گروه گراول ماسه‌ای- گلی، ٤٥ درصد در گروه ماسه گلی- گراولی و ٥ درصد در گروه گراول گلی می‌گنجد. از بین روابط تجربی استفاده شده، بیشترین مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه‌شده مربوط به رابطه کزنی- کارمن (بین ۰/۳۸ تا ٤/۳ سانتی‌متر بر روز) و ترزاقی (۰/۲ تا ۲/۸ سانتی‌متر بر روز) بود، بنابراین به نظر می‌رسد که مقادیر به‌دست‌آمده از این دو رابطه بیشتر نزدیک به واقعیت باشد. از سوی دیگر باید به این نکته توجه داشت که با در نظر گرفتن شرایط و محدودیت استفاده از روابط تجربی، تنها رابطه گستافسون قابل کاربرد برای تخمین هدایت هیدرولیکی همه ۲۰ نمونه مورد مطالعه‌است. مقدار هدایت هیدرولیکی محاسبه‌شده از این رابطه بین ۰/۱ تا ۱/٤ سانتی‌متر بر روز می‌باشد که باتوجه به وجود گراول قابل توجه در نمونه‌ها، این مقدار هدایت هیدرولیکی کمتر از مقدار واقعی آن به‌نظر می‌رسد. با توجه به موارد اشاره‌شده، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از روابط تجربی مختلف برای محاسبه هدایت هیدرولیکی آبخوان‌ها نتایج متفاوتی را نشان می‌دهد و دامنه گسترده تغییرات هدایت هیدرولیکی محاسبه‌شده به محدودیت‌های موجود برای هریک از روابط برمی‌گردد. بنابراین برای صحت‌سنجی مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسباتی، انجام آزمایش پمپاژ و یا اسلگ تست در منطقه پیشنهاد می‌شود.

مراجع

1. Todd, D.K., and Mays, L.W., "Groundwater hydrology", John Wiley and Sons, (2004).
2. Ritzema, H.P., "Drainage principles and applications", Wageningen: ILRI publication. 16 (2006).
3. Fetter, C.W., "Applied hydrogeology", Waveland Press, (2018).
4. Sahu, S., and Saha, D., "Empirical methods and estimation of hydraulic conductivity of fluvial aquifers", *Journal of Environmental & Engineering Geoscience*, Vol. 22, No. 4, pp. 319-340, (2016).
5. Wang, J.P., François, B., and Lambert, P., "Equations for hydraulic conductivity estimation from particle size distribution: A dimensional analysis, "*Water Resources Research*, Vol. 53, No. 9, pp. 8127-8134, (2017).

6. Arfeen, N., and Ali khan, T., "Evaluation of PSD Models for the Estimation of Hydraulic Conductivity for Different Soil Textural Classes", *International Journal of Engineering Works*, Vol. 7, No. 10, pp. 338-341, (2020).

7. Ishaku, J.M., Gadzama, E.W., and Kaigama, U., "Evaluation of empirical formulae for the determination of hydraulic conductivity based on grain-size analysis", *Journal of geology and mining research*, Vol. 3, No. 4, pp. 105-113. (2011).

8. Hwang, H.T., Jeen, S.W., Suleiman, A.A., and Lee, K.K., "Comparison of saturated hydraulic conductivity estimated by three different methods", *Water*, Vol. 9, No. 12, p. 942. (2017).

9. Aghanabati, A., "Geology of Iran", Geological Survey and Mineral Exploration of Iran. In Persian (2004).

10. Valentine, P.C., "Sediment classification and the characterization, identification, and mapping of geologic substrates for the glaciated Gulf of Maine seabed and other terrains", *Providing a physical framework for ecological research and seabed management*, (No. 2019-5073), US Geological Survey, (2019).

11. Folk, R.L., "Practical Petrographic Classification of Limestones", *AAPG Bulletin*, Vol. 43, No.1, pp. 1–38, (1959).

12. Odong, J., "Evaluation of empirical formulae for determination of hydraulic conductivity based on grain-size analysis", *Journal of American Science*, Vol. 3, No. 3, pp. 54-60, (2007).

13. Zhang, S., "Relationship between particle size distribution and porosity in dump leaching (Doctoral dissertation", *University of British Columbia*, (2017).

14. Svensson, A., "Estimation of Hydraulic Conductivity from Grain Size Analyses A comparative study of different sampling and calculation methods focusing on Västlänken, Master's thesis, (2014).